

На правах рукописи



КОЛЕСНИКОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ

**СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ
ПОМЕЩЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ОХРАНЫ
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА**

**Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Белгород 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель:

Ильина Татьяна Николаевна,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Еремкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Теплогазоснабжение и вентиляция»
ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет
архитектуры и строительства»

Ангелюк Илья Павлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Инженерные системы в
строительстве» ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет имени В.И.
Вернадского»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск**

Защита состоится «24» января 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, ГУК 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте: https://gos_att.bstu.ru/dis/kolesnikov

Автореферат разослан «28» ноября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание требуемых условий для содержания животных, а также снижение негативного воздействия отходов животноводческих предприятий на окружающую среду являются актуальными проблемами аграрно-промышленного комплекса. Выбросы свиноводческих предприятий способствуют истощению водных ресурсов, загрязнению воздуха аммиаком, пылью и другими биоаэрозолями, что приводит к ухудшению экологической обстановки как на территории животноводческих предприятий, так и прилегающих районов.

Комплексное решение проблемы заключается не только в применении эффективной системы вентиляции в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений, но и внедрении современных технологий по утилизации тепловых выбросов, удалению запахов, улавливанию вредных газов. Разработке системы вентиляции посвящено большое количество работ, однако совершенствование способов создания микроклимата в помещениях животноводческих комплексов с элементами охраны окружающей среды является важной и актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022 г., 2023 г., и в рамках проекта «Снижение выбросов на свинокомплексах АПК загрязняющих веществ в атмосферу с очисткой и утилизацией навозно-технологических стоков методами биоремедиации», 2020г.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиям в области совершенствования технологий содержания свиней, а также оценки экологической безопасности свиноферм посвящены работы Найденко В.К. (ГНУ СЗНИИМЭСХ, г. Санкт-Петербург). Разработкой устройств для очистки воздуха животноводческих помещений и снижения негативного воздействия отходов животноводства на окружающую среду активно занимаются ученые Миронов В.Н., Гордеев В.В., Хазанов В.Е., Краснова В.Л., Маркова А.Е. (ИАЭП - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург), Ашихмина Т.В. (Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж). Известны работы Ушаковой Н.А. (ФГБУН Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва); Андреева Л.Н. (ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», г. Тюмень) и др.

За рубежом решению выше указанных задач и проблем посвящены научные труды Millet S., Omede A.A., Odoemelam V.U., Martinez J., Ogbuewu I.P.

Цель работы: Совершенствование системы создания требуемых параметров микроклимата в помещениях свиноводческих комплексов за счет организации приточно-вытяжной вентиляции и использования технологии биоремедиации для охраны воздушной среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследования тепло-массообменных процессов в животноводческих помещениях различного назначения с учетом избыточных тепло- и влагопоступлений;
- разработать наиболее рациональный способ организации воздухообмена на основании анализа моделей распределения воздушных потоков;
- для утилизации тепла, влаги и улавливания газообразного аммиака в удаляемом воздухе разработать тепло-массообменную установку;
- провести теоретические и экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рекуператоре типа «труба в трубе» при различных температурах приточного и вытяжного воздуха;
- провести исследования биодобавок для снижения концентрации вредных пахучих веществ в корпусах содержания животных и удаляемом воздухе;
- разработать патентозащищенную систему вентиляции животноводческих помещений с элементами утилизации тепла, влаги и вредных выбросов;
- разработать инженерную методику расчета энергоэффективной системы вентиляции для производственных помещений свиноводческих комплексов.

Научная новизна исследования:

1. Получены аналитические зависимости температуры и подвижности внутреннего воздуха в производственном помещении животноводческого комплекса от теплотехнических характеристик наружного воздуха для различных периодов года и способов организации воздухообмена. Предложен показатель эффективности организации воздухообмена, характеризующий интенсивность изменения параметров воздушной среды в производственном помещении от температуры наружного воздуха.

2. Разработан рациональный способ организации воздухообмена, обеспечивающий удаление избытков теплоты из верхней зоны производственного помещения и предотвращающий образование застойных зон вредных газов с высокой плотностью в рабочей зоне содержания животных.

3. Предложено критериальное уравнение с уточненным коэффициентом для расчета процесса теплоотдачи в рекуператоре по типу «труба в трубе». Установлены расчетные и экспериментальные значения концентрации водного раствора аммиачной воды, образуемой в результате улавливания аммиака в тепло-массообменной установке.

4. Получены уравнения для расчета снижения концентрации сероводорода, аммиака и углекислого газа в воздухе производственного помещения для различных видов добавок и времени воздействия деструктора.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке способа снижения вредных выбросов из производственных помещений животноводче-

ских комплексов, обеспечении требуемых параметров микроклимата за счет организации приточно-вытяжной вентиляции с системой рекуперации избыточного тепла и влаги. Предложено уточненное критериальное уравнение для описания тепло-массообменных процессов в рекуператоре, позволяющее прогнозировать работу приточно-вытяжной системы. Получены уравнения влияния вида и концентрации биодеструкторов на снижение концентрации вредных пахучих веществ в производственном помещении с использованием технологии биоремедиации.

Практическая значимость работы.

Разработана система вентиляции животноводческих помещений, включающая тепло-массообменное устройство для утилизации тепло и влагоизбытков, а также улавливания аммиака (патент РФ № 2799158).

Разработана программа для ЭВМ расчета теплопроизводительности и коэффициента трансформации теплонасосной установки, входящей в систему вентиляции для обеспечения требуемых параметров микроклимата при различных температурах наружного воздуха (свидетельство № 2023666853). Разработана программа инженерного расчета энергоэффективной системы вентиляции и алгоритм комплексной системы создания параметров микроклимата в животноводческих помещениях с использованием технологии биоремедиации.

Методика расчета и результаты программы для ЭВМ использованы в практике проектирования в ООО «Интеллектуальные теплоэнергетические системы», а также в учебном процессе для лекционных, лабораторных и практических занятий, курсовом и дипломном проектировании для студентов бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство» и магистратуры направления 08.04.01 «Строительство».

Методология и методы исследования. Разработка и исследование систем и устройств базируются на использовании классических положений теплотехники, гидравлики, теплообмена, теории подобия, методов численного моделирования с помощью программных комплексов, планирования многофакторного эксперимента и статистической обработки результатов. Экспериментальные исследования выполнены на разработанной автором установке и в промышленных условиях с использованием современного поверенного оборудования и приборов: газоанализаторы СЕАН П-4, назальный ольфактометр Nasal Ranger, термоанемометр Testo, датчики измерения температуры и влажности.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты моделирования воздушных потоков в помещении с избытками тепла и влаги при различных способах организации воздухообмена и времени года;
- уточненное критериальное уравнение расчета процесса теплоотдачи в рекуператоре по типу «труба в трубе»;

- расчетные и экспериментальные значения концентрации водного раствора аммиачной воды, образуемой в результате улавливания аммиака в тепло-массообменной установке;

- зависимости влияния биодеструкторов запахов на концентрацию вредных пахучих веществ в производственном помещении;

- рациональный способ организации приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией тепла, влаги и улавливания аммиака;

- алгоритм и программа инженерного расчета энергоэффективной системы вентиляции животноводческих помещений свиноводческого комплекса.

Степень достоверности научных положений, результатов и выводов диссертационной работы подтверждается использованием современных методов теоретических и экспериментальных исследований, высокоточного поверенного оборудования и приборов, удовлетворительной степенью схожести аналитических результатов с экспериментальными данными и известными результатами, представленными в научной литературе.

Апробация результатов работы. Основные положения работы получили положительную оценку на научных конференциях: Высшая школа: научные исследования (Москва, 2020г.); XIV Международная научно-практическая конференция «Молодежь и научно-технический прогресс» (Губкин, 2021г.); Научно-практическая конференция «Энергетика в современном мире (Чита, 2021г.); International University Scientific Forum «Practice Oriented Science: UAE-RUSSIA-INDIA» (UAE, 2023г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из которых 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus, получены патент на изобретение РФ и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 14 таблиц, 42 рисунка, библиографический список из 101 источника, 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена теоретическая и практическая значимость решаемых задач.

В первой главе представлена классификация животноводческих комплексов, рассмотрены способы организации воздухообмена, представлена характеристика вредных поступлений в производственные помещения и способы их удаления. Общий анализ литературных источников показал, что разработка энергоэффективных способов создания требуемых параметров мик-

роклимата в производственных помещениях животноводческих комплексов является весьма актуальной, недостаточно изучена и требует серьезных исследований, особенно для регионов с развитым агропромышленным комплексом. Белгородская область является лидером по количеству свиней в Российской Федерации, и ее доля составляет 18,8%.

Рабочей гипотезой исследования является создание эффективной системы воздухообмена за счет механической системы вентиляции с тепло-массообменным устройством для утилизации тепло и влагопоступлений, а также улавливания аммиака. Методологические основы работы включают теоретические и экспериментальные исследования движения воздушных потоков в помещениях при различной организации воздухообмена, разработку тепло-массообменного устройства на основании теории подобия, проведение исследований с разработкой рекомендаций по созданию требуемых параметров микроклимата и экологической обстановки в производственных помещениях.

Во второй главе рассмотрены основы моделирования аэродинамики воздушных потоков и тепло-массообменных процессов в помещениях с избытками тепла и влаги. С помощью программного комплекса Solid Works Flow Simulation проведено моделирование распределения температур и скоростей воздушных потоков в производственном помещении свиного комплекса при различных способах организации воздухообмена. Результаты моделирования распределения воздушных потоков представлены на рисунках 1-3.

Распределение температур (рисунок 1) при работе естественной системы вентиляции для всех периодов года не соответствует требуемым параметрам микроклимата. В теплый период года наблюдается значительное превышение температуры воздуха внутри откормочного помещения до 35-40 °С. В холодный и переходный периоды года область холодного воздуха с температурой 10-13 °С находится в рабочей зоне пребывания животных и работающего персонала, создает некомфортные условия.

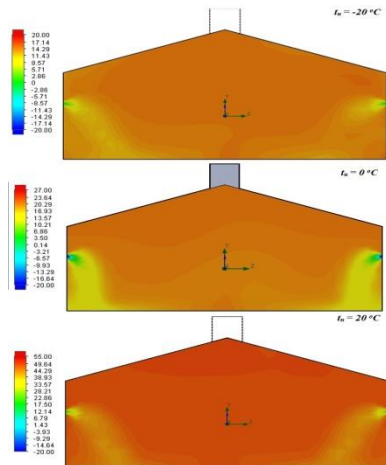


Рисунок 1 – Распределение температур воздушных потоков внутри помещения при естественной вентиляции и $t_n = -20, 0, 20$ °С

Распределение скоростей воздушных потоков в рабочей зоне помещения для естественной системы вентиляции (рисунок 2) находится в допустимых пределах для теплого периода. Для холодного и переходного периода наблюдается несколько завышенная подвижность воздуха (0,5-0,6 м/с), что в совокупности с низкой температурой может провоцировать заболевания животных.

Распределение температур и скоростей воздуха в корпусе откорма при подаче подготовленного воздуха через приточно-вытяжную систему вентиляции соответствует нормативным значениям (рисунок 3). Температура воздуха в рабочей зоне находится в пределах 18 градусов, скорость воздуха составляет 0,2-0,5 м/с.

По результатам моделирования получены зависимости распределения температур и скоростей воздушных потоков внутри помещения свиноводческого комплекса от способа организации воздухообмена при различных температурах наружного воздуха (рисунок 4).

Предложен условный показатель эффективности организации воздухообмена, представляющий отношение коэффициентов уравнений естественной системы вентиляции (a_1^{EB} и b_1^{EB}) к коэффициентам механической системы соответственно (a_1^{MB} и b_1^{MB}):

$$k_t = \frac{a_1^{EB}}{a_1^{MB}} = \frac{0,575}{0,025} = 23 \quad \text{и} \quad k_v = \frac{b_1^{EB}}{b_1^{MB}} = \frac{0,0075}{0,0025} = 3. \quad (1)$$

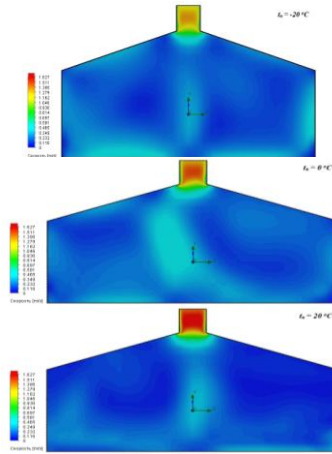


Рисунок 2 – Распределение скоростей воздушных потоков внутри помещения при естественной вентиляции и $t_n = -20, 0, 20^\circ\text{C}$

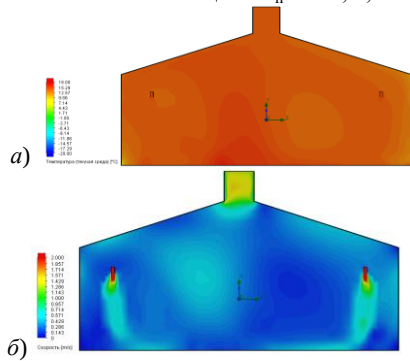


Рисунок 3 – Распределение температур (а) и скоростей (б) воздушных потоков через приточные каналы механической системы вентиляции при $t_{tr} = 20^\circ\text{C}$

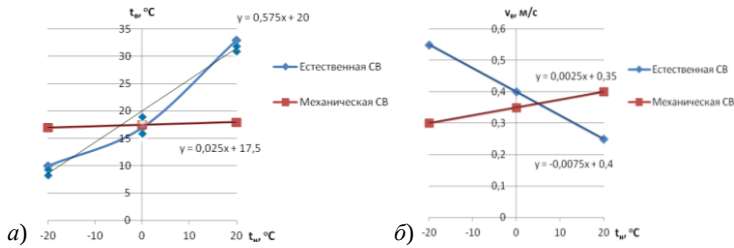


Рисунок 4 – Зависимость распределения температур (а) и скоростей (б) воздушных потоков внутри помещения от температуры наружного воздуха при различных способах организации воздухообмена

Эффективность механической системы вентиляции по отношению к естественной в большей степени проявляется на изменении температуры внутреннего воздуха по сравнению с изменением подвижности воздуха внутри помещения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов уравнения (1). Также при работе приточно-вытяжной вентиляции параметр y ($t_{\text{вн}}$ и v) в меньшей мере зависит от параметра x , т.е. от изменения температуры наружного воздуха ($t_{\text{н}}$), а следовательно, создаются более постоянные комфортные условия для пребывания животных, чем при работе естественной системы вентиляции.

Разработана энергоэффективная приточно-вытяжная механическая система вентиляции (рисунок 5), которая включает тепло-массообменное устройство (ТМУ) для утилизации избытков тепла, влаги и улавливания паров аммиака, воздушный тепловой насос для подготовки воздуха в холодный и теплый периоды (патент на изобретение РФ № 2799158).

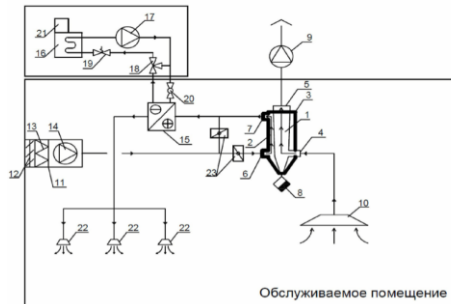


Рисунок 5 – Схема системы вентиляции животноводческих помещений:

1 - вытяжной воздуховод; 2 - приточный воздуховод; 3 - теплообменник типа «труба в трубе»; 4, 5 - тангенциальный входной и выходной вытяжные патрубки; 6, 7 - входной и выходной патрубки приточные; 8 - конденсатоотводчик; 9 - вытяжной вентилятор; 10 - вытяжной зонт; 11 - приточное устройство; 12 - Приточный клапан; 13 - фильтр; 14 - приточный вентилятор; 15-21 - тепловой насос; 22 - воздухораспределители; 23 - запорные клапаны

Для разработки экспериментальной установки рекуператора использована теория подобия. Получен постоянный коэффициент подобия, который служит для перехода от натурной установки к модельной и позволяет получать необходимые зависимости процессов тепло- и массообмена на модельной установке с последующим применением их к реальным условиям. Произведено моделирование тепло-массообменных процессов на модельной установке. Установлены режимные параметры температуры и скорости приточного и удаляемого воздуха, обеспечивающие эффективность тепломассопереноса.

Для описания процессов теплообмена использованы критериальные уравнения для ТМУ по типу «труба в трубе»:

$$Nu_{y\varnothing} = A \cdot Re_{y\varnothing}^{0,8} \cdot Pr_{y\varnothing}^{0,43} \cdot (Pr_{y\varnothing} / Pr_{cm,y\varnothing})^{0,25}; \quad (2)$$

$$Nu_{np} = A \cdot Re_{np}^{0,8} \cdot Pr_{np}^{0,43} \cdot (Pr_{np} / Pr_{cm,np})^{0,25} \cdot (d_{np} / d_n^{cm})^{0,18}. \quad (3)$$

Со стороны греющего теплоносителя справедливо уравнение (2), а со стороны нагреваемого теплоносителя - уравнение (3), так как оно учитывает теплоотдачу от внутренней (контактирующей) стенки.

По результатам моделирования тепло-массообменных процессов в ТМУ получено, что при подаче приточного и удалении вытяжного воздуха через входные патрубки, расположенные перпендикулярно по отношению к каждой из труб теплообменного устройства, процесс теплообмена происходит неэффективно с образованием застойных зон. Поэтому принято решение установить патрубки приточного и вытяжного воздуховода тангенциально по отношению к теплообменнику.

Также установлено, что при температурах наружного воздуха выше -10°C обмерзания стенок внутренней трубы теплообменника происходить не будет, так как минимальное и среднее значение температуры стенок больше 0°C . При этом температура поверхности устанавливается ниже температуры точки росы удаляемого воздуха, что приведет к конденсации влаги с последующим растворением и улавливанием в ней паров аммиака.

В третьей главе представлена характеристика объекта исследования. Для корпуса откорма на 70 голов, живой массой по 100 кг, произведен расчет производительности системы вентиляции по избыткам влаги, теплоты и по содержанию углекислого газа в помещении. В качестве расчетного воздухообмена определена производительность по тепловыделениям. Произведен расчет теплового баланса животноводческих помещений.

С учетом анализа распределения вредных поступлений газов и их свойств рассмотрены способы организации воздухообмена на свиноводческом комплексе на основе математического моделирования для различных периодов года. Для визуализации процесса подачи и распределения воздуха с использованием программы SolidWorks была построена модель воздушных потоков при работе приточно-вытяжной системы вентиляции для холодного,

переходного и теплого периодов года при различных соотношениях расходов вытяжного воздуха из нижней и верхней зон помещения (20/80; 30/70; 40/60; 50/50) соответственно.

По результатам моделирования была получена зависимость температуры внутреннего воздуха в помещении от способа удаления вытяжного воздуха для всех периодов года (рисунок 6).

Установлено, что при использовании схемы вентиляции с удалением 30% воздуха снизу и 70% из верхней части помещения, достигается наилучшее распределение температур внутреннего воздуха для всех периодов года. Помимо этого данная схема вентиляции позволит удалять избыточную теплоту из верхней зоны и предотвратит образование застойных зон вредных газов в рабочей зоне содержания животных.

Произведена разработка модельной установки теплообменного устройства (рисунок 7). Проведены экспериментальные исследования тепло-массообменных (ТМО) процессов в модельной установке при различных температурах, расходах и скоростях приточного и удаляемого воздуха.

Исследования проведены при температурах наружного воздуха, равных -8, -5, 0 °С. Температура внутреннего воздуха составляла ≈ 23 °С. По результатам проведенных замеров произведен расчет процессов теплообмена.

На основании расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи в уравнениях описания тепло-массообменных процессов для данного рекуперативного устройства установлены численные значения коэффициента A , которые составляют 0,131 и 0,134 для греющего и нагреваемого теплоносителя соответственно:

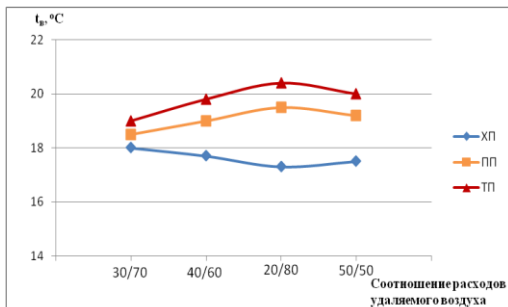


Рисунок 6 – Зависимость температуры внутреннего воздуха в помещении от соотношения расходов удаляемого воздуха из нижней и верхней зоны соответственно



Рисунок 7 – Фото экспериментального стенда для исследования работы теплообменного устройства

$$Nu_{\gamma\delta} = 0,131 \cdot Re_{\gamma\delta}^{0,8} \cdot Pr_{\gamma\delta}^{0,43} \cdot (Pr_{\gamma\delta} / Pr_{cm,\gamma\delta})^{0,25}; \quad (4)$$

$$Nu_{np} = 0,134 \cdot Re_{np}^{0,8} \cdot Pr_{np}^{0,43} \cdot (Pr_{np} / Pr_{cm,np})^{0,25} \cdot (d_{np} / d_n^{cm})^{0,18}. \quad (5)$$

Так как отличие полученных коэффициентов A незначительно, а также с учетом небольшого численного значения соотношения $(d_{np}/d_n^{cm})^{0,18}$, предлагается уточненное уравнение описания ТМО процессов как со стороны греющего, так и нагреваемого теплоносителя вида:

$$Nu = 0,133 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr / Pr_{cm})^{0,25}. \quad (6)$$

В полученном уравнении значение коэффициента A (0,133) можно рассматривать как показатель, оценивающий влияние инерционных сил на интенсивность тепло и массообменных процессов за счет тангенциального ввода теплоносителя.

По результатам аналитических и экспериментальных данных построена зависимость коэффициента теплоотдачи для данного теплообменного устройства от температуры и режима обтекания теплоносителя, которая представлена на рисунке 8.

Для данного тепло-массообменного устройства проведено двухфакторное планирование эксперимента для расчета коэффициента теплоотдачи Y в зависимости от температуры X_1 (-8, -5, 0 °C) и объемного расхода воздуха X_2 (от 140 до 250 м³/ч). Получено уравнение множественной регрессии:

$$Y = 8,2734 - 0,0908X_1 + 0,1898X_2. \quad (7)$$

Статистическая значимость уравнения проверена с помощью критерия Фишера, который больше критического, равного 5,1433. Установлено, что 99.97% общей вариабельности Y объясняется изменением факторов X_j . Установлено также, что параметры модели статистически значимы.

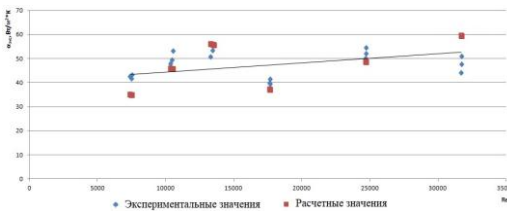


Рисунок 8 – График зависимости коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса

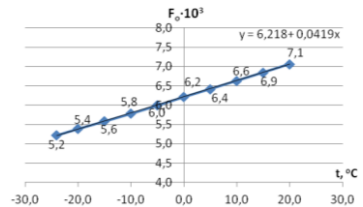


Рисунок 9 – График зависимости критерия Фурье от температуры наружного воздуха

В реальных условиях изменение температуры наружного воздуха происходит в широком диапазоне, что может повлиять на стационарность процессов теплообмена в системе вентиляции. Для оценки уровня влияния внешних факторов на процесс теплообмена произведен расчет критерия Фурье, характеризующего соотношение между скоростью изменения тепловых

условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы:

$$F_o = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad \text{где } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}. \quad (8)$$

В диапазоне температур от -24°C до 20°C за время $\tau = 3600$ с была получена зависимость изменения критерия Фурье от температуры наружного воздуха (рисунок 9) для теплообменной установки высотой $l = 3,3$ м. Как видно на рисунке 9, температура наружного воздуха в широком диапазоне незначительно влияет на изменение критерия Фурье. Следовательно, процесс теплообмена имеет стационарный характер.

Получена расчетная зависимость концентрации водного раствора аммиака, образующегося в ТМУ, от группы и массы животных (рисунок 10).

Проведены экспериментальные исследования по улавливанию аммиака в модельной установке. Определено количество улавливаемого аммиака, а также рассчитаны концентрации аммиачного раствора на выходе из ТМУ, значения которых нанесены в виде точек на полученную ранее зависимость (рисунок 10). Экспериментальные точки находятся в диапазоне результатов теоретических исследований.

Установлено, что массовая концентрация раствора находится в диапазоне от 0,08 до 0,55 %, что позволяет производить его утилизацию через систему канализации. Также возможно применение водного раствора аммиака как жидкого удобрения, содержащего азот. Проведенные исследования подтверждают хорошую растворимость аммиака при взаимодействии с водой.

В четвертой главе представлены результаты исследования комплексной технологии биоремедиации с применением биодеструкторов, которая используется для дегазации выбросов в животноводческих помещениях, а также для сокращения сроков карантинирования, обеззараживания и повышения полезности утилизации переработанных стоков на полях. В работе исследованы биодеструкторы, применяемые на территории Белгородской области («Экомик Про-В», «Эмбионик», «Бактофор-3», «Санвит», «Санвит-К» и «Эминекст»). В основе всех применяемых биопрепаратов используется сообщество из 6-8 известных штаммов (*bacillus subtilis*, *ацидофильные лактобактерии* и *бифидобактерии*) с титром до 10 степени концентрации.

Для оценки содержания вредных веществ в емкостях со стоками выполнены измерения концентрации угарного газа (CO), двууглекислого газа (CO_2), оксида серы (SO_2), метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3).

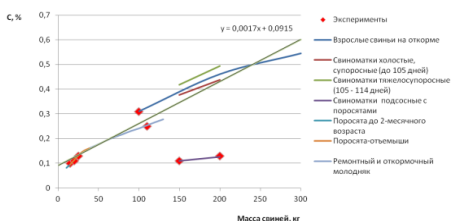


Рисунок 10 – Зависимость концентрации аммиачного раствора от живой массы животных с указанием экспериментальных точек

Для измерения концентрации газов использовались газоанализаторы СЕАН П-4. Результаты измерений концентрации газов приведены на рисунке 11.

Также, при обработке результатов методом аппроксимации были получены уравнения, позволяющие оценивать эффективность биопрепаратов для снижения концентрации выделяемых газов.

Анализ результатов исследования показал, что наиболее эффективно препараты удаляют сероводород H_2S и оксид углерода.

Изменение концентрации аммиака NH_3 при добавке деструкторов дает большой разброс данных, аппроксимация которых позволила получить уравнение (9). Изменение концентрации оксида углерода от времени воздействия реагентов представлено уравнением (10). Зависимость влияния деструкторов на изменение концентрации сероводорода описывается уравнением (11). Наилучшие результаты по комплексному удалению вредностей показали препарат «Экомик Про-В» и препарат «Эминекст».

$$y = -5,4333x^3 + 44,057x^2 - 111,71x + 137,16; \quad (9)$$

$$y = -0,5333x^3 + 7,0857x^2 - 29,981x + 40,76; \quad (10)$$

$$y = 2,0833x^4 - 30,317x^3 + 159,57x^2 - 357,13x + 285,8, \quad (11)$$

где y – это концентрация вещества в воздухе, mg/m^3 , а x – условная величина, обозначающая время воздействия как периодичность замеров (4 дня). Например, для первого дня проведения замеров соответствует значение $x=1$, а для 5-го дня эксперимента $x=2$ и т.д. Полученные уравнения могут быть использованы для расчета снижения концентрации вредных пахучих веществ в зависимости от продолжительности испытаний.

В пятой главе представлены результаты опытно-промышленного испытания биопрепаратов для снижения запахов в производственном помещении

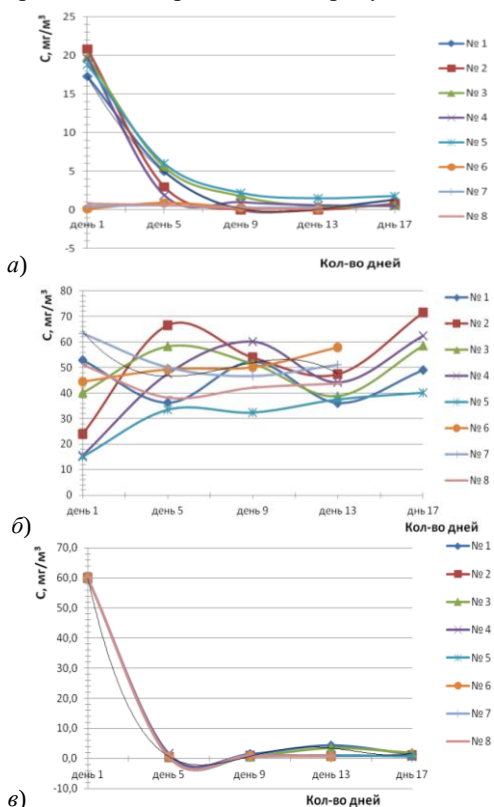


Рисунок 11 – Результаты замеров содержания оксида углерода (а), аммиака (б) и сероводорода (в)

и расчета экономической эффективности разработок. На базе свинокомплекса «Оскольский бекон-3» ООО «АПК «ПромАгро» были проведены испытания трех биопрепаратов для снижения выделений запахов в помещениях и лагунах («Nonfeto», «Санкрит-К-форте», «Бактофор-3»).

Анализ результатов проведенных испытаний показал незначительную эффективность препарата «Бактофор-3» в рекомендованных дозировках (9-10 мл концентрата на 1 м³ навозостока). Однако после внесения дополнительных концентраций (доза до 30-35 мл концентрата на 1 м³) достигнута хорошая эффективность по ослаблению запаха, высокая эффективность по обеззараживанию за период 30-40 дней карантинирования и существенный эффект по увеличению в осадке.

Для оценки содержания вредных веществ в помещениях для откорма свиней и на выбросе вентиляционных шахт корпусов свинокомплекса выполнены измерения концентрации угарного газа, двууглекислого газа, оксида азота, оксида серы, метана, сероводорода и аммиака.

На основании полученных данных выполнен расчет рассеивания вредных веществ на территориях, прилегающих к свинокомплексу. Установлено, что смесь тяжелых газов образует более обширную неблагоприятную зону распространения выбросов вредных веществ по сравнению с аммиаком. Установлено наличие фоновой концентрации вредных веществ на приточных клапанах, что свидетельствует о захвате приточной вентиляцией удаляемых из помещения вредных веществ.

Исследования показали, что во многих корпусах содержания животных, уровень неприятных запахов превышает предел измерения ольфактометра, что в совокупности со значительными объемами выбрасываемого вытяжного воздуха, загрязненного аммиаком и сероводородом, создает неблагоприятные условия как для людей, проживающих в ближайших населенных пунктах, так и для выращиваемых животных.

Разработана программа расчета энергоэффективной системы вентиляции животноводческого помещения свиноводческого комплекса, включающей тепло-массообменное устройство.

Произведен ориентировочный расчет сметной стоимости разработанной системы вентиляции, которая составила $\approx 1,3$ млн руб. Экономическая и экологическая эффективность разработок заключается в снижении на 15-20 % энергетических затрат за счет утилизации теплоты в удаляемом воздухе. Предложен алгоритм (рисунок 12) комплексной системы создания параметров микроклимата в животноводческих помещениях, включающий организацию приточно-вытяжной системы вентиляции с использованием технологии биоремедиации.

После внесения биодеструкторов в ванны корпусов содержания животных происходит снижение концентрации сероводорода на 98% от первоначальной (0,6 мг/м³). Концентрация аммиака до реализации предложенных

мероприятий составляла $4,8 \text{ мг/м}^3$. При использовании технологии биореми-деации, а также после взаимодействия загрязненного аммиаком воздуха с конденсатом в ТМУ, концентрация аммиака снизится практически на 70 % от начального значения. В результате на выбросе в атмосферу она составит $1,5 \text{ мг/м}^3$.



Рисунок 12 – Алгоритм комплексной системы создания параметров микроклимата в животноводческих помещениях с элементами охраны воздушного бассейна

Методика расчета и результаты программы для ЭВМ внедрены в практике проектирования ООО «Интеллектуальные теплоэнергетические системы» г. Белгород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Проведен анализ экологической обстановки на территории животноводческих комплексов. Представлена классификация свиноводческих комплексов и способов создания требуемых параметров микроклимата в производственных помещениях, необходимых как для жизнедеятельности свиней, так и обеспечения требований охраны окружающей среды. На большинстве предприятий используется естественная вентиляция, которая не обеспечивает выполнение санитарных норм.

2. На примере свиноводческого комплекса «Оскольский бекон-3» рассмотрено численное моделирование распределения воздушных потоков, проведенное с использованием программного комплекса SolidWorks Flow Simulation. Исследования показали, что при естественной вентиляции в холодный период года область холодного воздуха с температурой $10-13^\circ\text{C}$ находится в рабочей зоне пребывания животных и работающего персонала, что создает некомфортные условия. Подвижность воздуха немного завышенная ($0,5-0,6 \text{ м/с}$), что в совокупности с низкой температурой может провоцировать заболевания животных. Также и в теплый период года параметры мик-

роклимата не соответствуют нормативным, так как температура в зоне содержания поголовья составляет 35-40 °С.

3. С учетом количественного соотношения газовых выделений и теплопоступлений в производственном помещении разработана наиболее рациональная система организации механической вентиляции с забором 30% объема удаляемого воздуха из нижней и 70 % объемного расхода воздуха из верхней части производственного помещения, с возможным изменением данного соотношения не более 5%. Это позволит удалять концентрирующуюся в верхней зоне избыточную теплоту и предотвратит образование застойных зон вредных газов с высокой плотностью в зоне содержания животных в нижней части помещения.

4. Разработана система вентиляции животноводческих помещений, включающая тепловой насос для подготовки воздуха в теплый и холодный периоды года, а также тепло-массообменное устройство для утилизации избытков тепла, влаги и улавливания паров аммиака (патент № 2799158, РФ). Произведен расчет приточно-вытяжной вентиляции производственного цеха при выбранном способе организации воздухообмена, подобрано вентиляционное оборудование.

5. С помощью теории подобия разработана экспериментальная тепло-массообменная установка типа «труба в трубе». Проведены исследования тепло- и массообменных процессов при различных теплофизических и гидродинамических параметрах воздушных сред, на основании которых получено уточненное критериальное уравнение, позволяющее рассчитывать количество утилизируемой теплоты в системе вентиляции свиноводческих помещений. Исследования процессов улавливания аммиака в экспериментальной тепло-массообменной установке подтвердили расчетные зависимости концентрации аммиака в растворе, образуемом в реальных условиях животноводческих помещений.

6. С целью удаления вредных запахов из помещений содержания животных исследованы биодеструкторы запахов, действие которых основано на использовании биохимического потенциала микроорганизмов для детоксикации загрязняющих веществ или снижения их концентрации в окружающей среде. В лабораторных условиях были произведены исследования 6 препаратов («Экомик Про-В», «Эмбионик», «Бактофор-3», «Санвит», «Санвит-К» и «Эминекст»). Получены зависимости снижения концентрации сероводорода, аммиака и углекислого газа от вида биодеструктора и времени воздействия. Установлено, что наиболее эффективными добавками для снижения концентрации выделяемого в помещениях аммиака и сероводорода являются препарат «Экомик Про-В» и препарат «Эминекст», которые целесообразно использовать в технологии биоремедиации.

7. Разработана программа расчета энергоэффективной системы вентиляции животноводческого помещения свиноводческого комплекса, включаю-

щей тепло-массообменное устройство, и расчета теплопроизводительности теплонасосной установки для подготовки воздуха в теплый и холодный периоды года (свидетельство № 2023666853). Разработан алгоритм создания параметров микроклимата в производственных помещениях животноводческого комплекса с элементами охраны воздушного бассейна. Экономическая и экологическая эффективность разработок заключается в снижении на 15-20 % энергетических затрат за счет утилизации теплоты в удаляемом воздухе. При использовании технологии биоремедиации происходит снижение концентрации сероводорода на 98% от первоначальной ($0,6 \text{ мг/м}^3$). Концентрация аммиака на выбросе в атмосферу составит $1,5 \text{ мг/м}^3$, что практически на 70 % ниже базовой. Методика расчета и результаты программы для ЭВМ внедрены в практике проектирования ООО «Интеллектуальные теплоэнергетические системы» г. Белгород.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для разработки и внедрения инновационных решений в области создания комфортно-технологических условий в животноводческих помещениях и охраны воздушного бассейна.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с совершенствованием технологий и методов, направленных на улучшение условий содержания животных и обеспечение высокого качества микроклимата в помещениях с использованием современных систем мониторинга качества воздуха, а также с учетом адаптации технологий к различным климатическим условиям и типам животноводческих помещений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Ильина, Т.Н. Об экологической обстановке на территории свиного комплекса "Оскольский бекон-3" / Т.Н. Ильина, Ю.Е. Щедрина, А.Ю. Феоктистов, **М.С. Колесников**, Д.А. Евраев // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. - 2022. - №3. - С. 32-41. (К2) DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-32-41.

2. **Колесников, М.С.** Об эффективности применения биодеструкторов запахов на свиноводческих комплексах/ М.С. Колесников, Т.Н. Ильина, А.Ю. Феоктистов // Экология промышленного производства. - 2022. - № 3. - С. 58-62. (К2) DOI: 10.52190/2073-2589-2022-3-58.

3. Ильина, Т.Н. О способах обеспечения воздухообмена в цехах животноводческих комплексов / Т.Н. Ильина, **М.С. Колесников**, И.В. Крюков, П.А. Орлов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. - 2023. - № 3. - С. 46-55. (К2) DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-46-55.

4. Ильина, Т.Н. Моделирование процессов тепломассообмена в рекуператоре типа «труба в трубе» / Т.Н. Ильина, В.А. Уваров, **М.С. Колесников**, Д.А. Евраев, В.С. Кретьева // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. - 2024. - № 1. - С. 30-38. (K1) DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-30-38.

В издании, индексируемом в базе данных Scopus

5. Orlov, P., Il'ina, T., **Kolesnikov, M.**, Echina, A., Umerenkov, A. (2024). Heat Pump Unit in Heating and Air Recuperation of Premises. In: Vatin, N., Pakhomova, E.G., Kukaras, D. (eds) Modern Problems in Construction. MPC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 372. Springer, Cham. - Pp. 55-64. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6_6.

В сборниках трудов конференций

6. **Колесников, М.С.** Анализ способов повышения экологической безопасности животноводства / М.С. Колесников, Т.Н. Ильина // Межвузовский Международный конгресс. Высшая школа: научные исследования. Москва. 10 декабря. - 2020г. - Т. 1. - С. 160-166.

7. Ильина, Т.Н. Анализ способов организации приточно-вытяжной вентиляции на свиноводческих комплексах / Т.Н. Ильина, **М.С. Колесников**, Д.А. Евраев // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. «Молодежь и научно-технический прогресс». г. Губкин, 8-9 апреля. - 2021. - Т. 1. - С. 480-484.

8. **Колесников, М.С.** Современные способы теплоснабжения зданий различного назначения / М.С. Колесников, Т.Н. Ильина, П.А. Орлов // Энергетика в современном мире: сборник статей X Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Чита, 09-10 декабря 2021 года. Чита: Забайкальский государственный университет. - 2021. - С. 106-110.

9. Орлов, П.А. Интеграция тепловых насосов в теплоснабжение инженерных систем / П.А. Орлов, Т.Н. Ильина, **М.С. Колесников**, А.О. Ечина // Энергетика в современном мире: сборник статей X Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Чита, 09-10 декабря 2021 года. Чита: Забайкальский государственный университет. - 2021. - С. 121-125.

10. **Kolesnikov, M.**, Il'ina, T., Evraev, D. Ventilation and heat recovery systems at livestock complexes. Materials of International University Scientific Forum. Practice Oriented Science: UAE – Russia - India. - 2023. - Pp. 72-76.

Объекты интеллектуальной собственности

11. Пат. № 2799158 РФ. МПК F24F 7/06 Система вентиляции животноводческих помещений / Ильина Т.Н., **Колесников М.С.**, Евраев Д.А., Орлов П.А., Ечина А.О // - № 2022134301; заявл. 26.12.2022; опубл. 04.07.2023, Бюл. №19. - 9 с.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666853 РФ. Программа расчета теплопроизводительности и коэффициента трансформации теплонасосной установки при различных температурах наружного воздуха / Орлов П.А., Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Орлов К.П., Колесников М.С. // - № 2023665884; заявл. 28.07.2023; опубл. 07.08.2023.

КОЛЕСНИКОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ

**СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ
ПОМЕЩЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ОХРАНЫ
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.11.2024 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 160

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46